

6.5 Eisschilde und Meeresspiegel

MARK CARSON & ARMIN KÖHL

Eisschilde und Meeresspiegel: Substanzielle Mengen an Wasser sind auf dem Land als Eis gespeichert. Wenn dieses Eis schmilzt und das Wasser in die Ozeane fließt, wird der Meeresspiegel ansteigen, jedoch verursacht dies nicht überall den gleichen Anstieg. Es wird erwartet, dass allein aufgrund des Schmelzens von Landeis der Meeresspiegelanstieg weltweit 20-30 cm bis zum Jahr 2100 betragen wird. In den tropischen Regionen kann der Meeresspiegelanstieg jedoch 40 cm erreichen. Da mehr Eis in einer sich weiter erwärmenden Erde schmelzen wird, könnte der Meeresspiegel bis zu ein paar Metern in den nächsten Jahrhunderten steigen. Bei ungebremster globaler Erwärmung könnte der Anstieg auf bis zu 7 m oder mehr in den nächsten Jahrtausenden zunehmen.

Ice sheets and sea level: There is much water stored in land ice on the Earth. As this ice melts and runs into the oceans, sea-level will rise, though it will not rise by the same amount everywhere. Globally, sea-level rise due to ice melt on land alone is expected to reach 20-30 cm by 2100. However, for tropical regions, this can become 40 cm of sea-level rise. As ice continues to melt in an increasingly warmer environment, sea-level could rise a couple of meters in the next few hundred years. If global warming continues unabated, this could become 7 meters or more over the next few thousand years.

Die großen Eisschilde und Gletscher der Erde enthalten ca. 30 Millionen km³ Wasser, die nach dem Abschmelzen und Abfluss in die Ozeane den Meeresspiegel um fast 70 m ansteigen lassen würden (IPCC 5. Sachstandsbericht [AR5], Kap. 4, VAUGHAN et al. 2013). Selbst bei starken Treibhausgasemissionen ist nicht unbedingt zu erwarten, dass das gesamte Eis in den nächsten paar tausend Jahren schmelzen wird. Allerdings sind erhebliche Änderungen der Gletscher und der Inlandeisgebiete bereits jetzt dokumentiert, und für das nächste Jahrhundert wird erwartet, dass ein weiteres Schmelzen des grönländischen und westantarktischen Eisschildes (GIS bzw. WAIS) den Anstieg des Meeresspiegels beeinflussen wird (AR5, Kap. 13, CHURCH et al. 2013). In ein paar hundert Jahren könnte der Meeresspiegelanstieg durch Wärmeausdehnung des Meerwassers und durch das Abschmelzen der Eisschilde und Gebirgsgletscher etwa 3 m betragen. Durch diesen Anstieg werden niedrig gelegene Marschlandschaften, Städte und Inseln überschwemmt und weite Landstriche für eine lange Zeit, vor allem in subtropischen und tropischen Regionen, verändert.

Gletscher und Eisschilde

Die hier diskutierten Gletscher umfassen Gebirgsgletscher (Hochlandgletscher) und Eisschilde. Eisschilde werden auch als »Kontinentalgletscher« bezeichnet. Sie unterscheiden sich aber von Hochlandgletschern in der Größe und ihrem stärkeren Einfluss auf das lokale Klima. Gletscher sind über die ganze Welt verteilt und finden sich sowohl in hohen Breiten als auch in tropischen Bergregionen. Diese Eismassen wurden seit dem vorletzten Bericht des IPCC (4. Sachstandsbericht, 2007) besser vermessen und über sie wird in umfangreichen Datenbanken Buch geführt (ARENDET et al. 2012). Aufgrund ihrer geringeren Größe reagieren Gletscher sehr viel empfindlicher als Eisschilde auf die globale Erwärmung und sie waren bereits in den letzten 100 Jahren dem Abschmelzen ausgesetzt. Es wird geschätzt, dass die Gletscher zwischen 1993 und 2010 etwa 1,5 cm zum Meeresspiegelanstieg beigetragen haben, während der GIS und der antarktische Eisschild (AIS) ca. 1 cm Anstieg verursacht haben (Abb. 6.5-1, AR5, Kap. 4 und 13; SHEPHERD et al. 2012). Der WAIS schmilzt und verursacht durch das Abbrechen großer Eismassen (Kalben) einen Meeresspiegelanstieg,

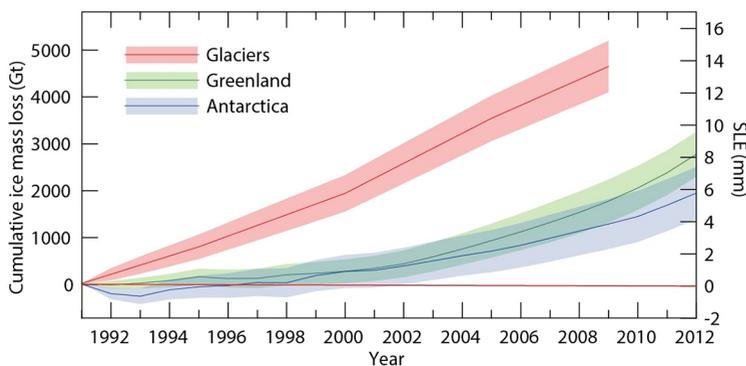


Abb. 6.5-1: Kumulativer Eismasseverlust von Gebirgsgletschern und Eisschilden in Gt sowie der zugehörige Meeresspiegelanstieg in mm (aus IPCC AR5, Technical Summary. Teil der Abb. TS3).

während der EAIS derzeit durch erhöhten Schneefall wächst. Beide Effekte heben sich zu einem gewissen Grad auf, so dass daraus nur ein kleinerer positiver Nettobeitrag aus dem AIS zum Anstieg des Meeresspiegels resultiert. Insgesamt ist der Beitrag aus GIS und AIS gering, wenn man berücksichtigt, dass der Meeresspiegel seit 1900 um gut 20 cm angestiegen ist (AR5, Kap. 13). Bei den vergangenen Gletscherschmelzraten wurde festgestellt, dass sie sich seit den frühen 1900er Jahren um etwa 40% beschleunigt haben (ebd.).

Bis 2100

Klimaprojektionen für die nächsten 100 Jahre sagen voraus, dass sich das Schmelzen der Eismassen auf dem Land beschleunigen wird (Abb. 6.5-2). Bis zum Jahr 2100 wird die Ausdehnung des Meerwassers auf Grund von Erwärmung voraussichtlich den größten Teil des globalen Meeresspiegelanstiegs verursachen. Den zweitgrößten Beitrag werden Gletscher, gefolgt von dem Beitrag der Eisschilde und des Grundwassers leisten (Abb. 6.5-3). Entsprechend dem stärksten Erwärmungsszenario RCP8,5 wird sich die Gletscherschmelze beschleunigen, so dass bis 2100 etwa ein Drittel des weltweiten Gesamtvolumens geschmolzen sein wird. Grönland wird voraussichtlich einen größeren Beitrag als die Antarktis leisten, da letzterer Beitrag auf dem unterschiedlichen Kurzzeitverhalten des west- und des ostantarktischen Eisschildes (EAIS) beruht.

Der positive Beitrag der Antarktis von ca. 1 cm steht dennoch im Kontrast zu den Vorhersagen der Klimamodelle, die für die Antarktis für die ersten Jahrzehnte der 2000er Jahre noch eine Verringerung des Anstiegs des Meeresspiegels voraussagen (Abb. 6.5-2). Längerfristig wird in der Gesamtbilanz der dynamische Eisverlust durch Kalben jedoch die Zunahme der Eisdicke im EAIS mehr als kompensieren, so dass auch die Modelle bis 2100 einen positiven Beitrag des AIS prognostizieren.

Der Anstieg des Meeresspiegels wird nicht gleichmäßig für alle Meeres- und Küstenregionen sein. Ein Großteil der Differenzen ergibt sich aus dem regionalen Muster von Landhebungen und Eisschmelze. Wenn die Eismassen schmelzen und ihre Masse in die Ozeane entlassen, verändert sich regional die Schwerkraft. Somit sinkt der Meeresspiegel in der Nähe der Quellen des Schmelzwassers, da dort die Anziehungskraft nun geringer ausfällt und das Meerwasser nicht mehr so stark zu den Eismassen gezogen wird. Allerdings steigt der Meeresspiegel dafür stärker in jenen Regionen, die sich weiter entfernt von den Eisschilden befinden, als der Anstieg aufgrund des zusätzlichen Schmelzwasservolumens nahelegt (Abb. 6.5-4, SLANGEN et al. 2014). Neben dieser regionalen Struktur des Anstiegs tragen Veränderungen der Winde, der Meeresströmungen (YIN et al. 2010) und der Grundwasserquellen (WADA et al. 2012) sowie die immer noch stattfindende An-

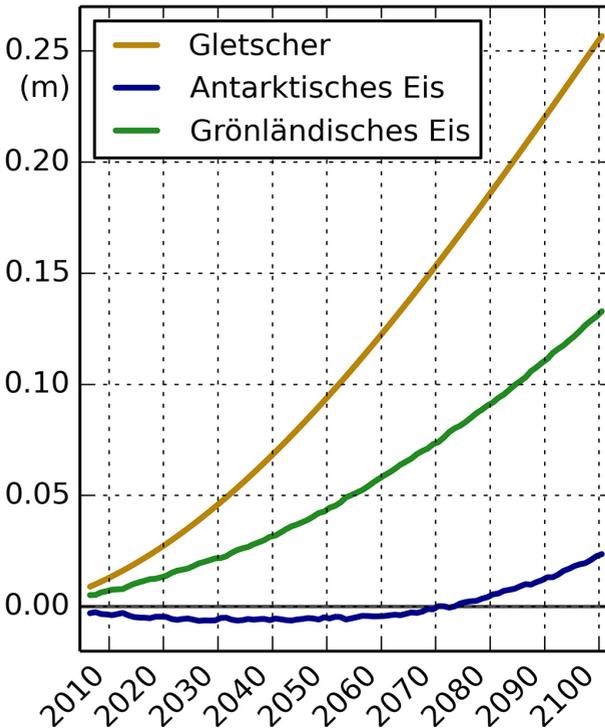


Abb. 6.5-2: Projizierte Zeitreihen des Meeresspiegelanstiegs durch Abschmelzen von Landeis, aufgeteilt nach den verschiedenen Quellen. Die Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs ist in allen Quellen zu sehen. Beachten Sie, dass das Eis der Antarktis für die ersten 40 Jahre zunimmt (nach Daten von SLANGEN et al. 2014).

passung der Erdkruste an die Veränderungen seit der letzten Eiszeit (PELTIER 2004) zu dem komplexen regionalen Muster des Anstiegs bei. Gegenüber dem mittleren globalen Anstieg findet an verschiedenen Küstenstandorten somit ein unterschiedlicher Anstieg statt (Abb. 6.5-5, CARSON et al. 2015). In dieser Abbildung ist die Abweichung des Meeresspiegelanstiegs an den Küsten vom globalen Mittelwert für jeden der Beiträge für das Szenario »starke Treibhausgasemissionen«

gezeigt. Ein Großteil der roten Regionen entlang der Küsten im tropischen und südlichen Pazifik und im Indischen Ozean, die laut Projektionen einen überdurchschnittlichen Anstieg des Meeresspiegels erleben werden, sind durch das Schmelzen der Gletscher, des AIS und des GIS beeinflusst. Jedoch erleben einige Standorte einen größeren, andere einen geringeren Anstieg mit typischerweise mindestens 10% Abweichungen vom globalen Mittel.

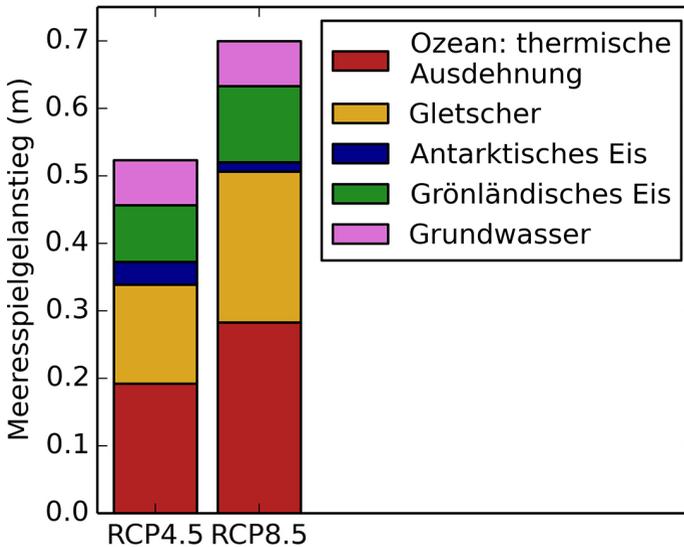


Abb. 6.5-3: Durchschnittlicher globaler Meeresspiegelanstieg 2081-2100 relativ zu 1986-2005 in m, aufgeteilt nach Beiträgen verschiedener Komponenten. RCP4.5 ist ein mittleres und RCP8.5 ein hohes Erwärmungsszenario. Der Beitrag der Grundwasseränderungen ist derselbe, weil er unabhängig von den Szenarien geschätzt wurde (nach Daten von SLANGEN et al. 2014).

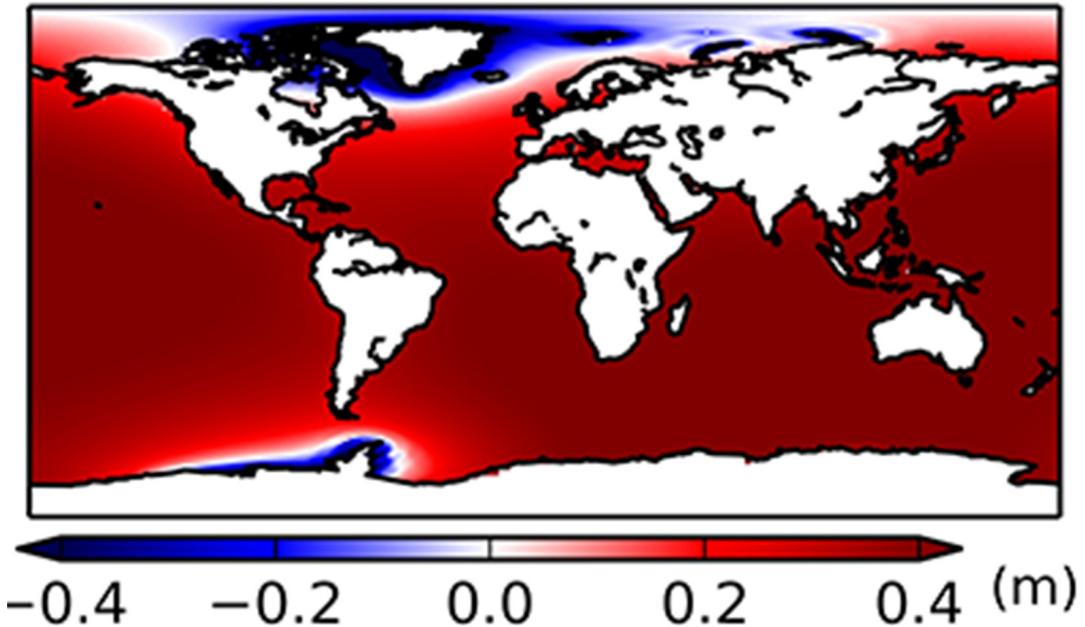


Abb. 6.5-4: Regionale Struktur des Meeresspiegelanstiegs bis zum Zeitraum 2081-2100 durch Abschmelzen der Gebirgsgletscher, des grönländischen und antarktischen Eisschildes, bezogen auf 1986-2005 (nach Daten von SLANGEN et al. (2014).

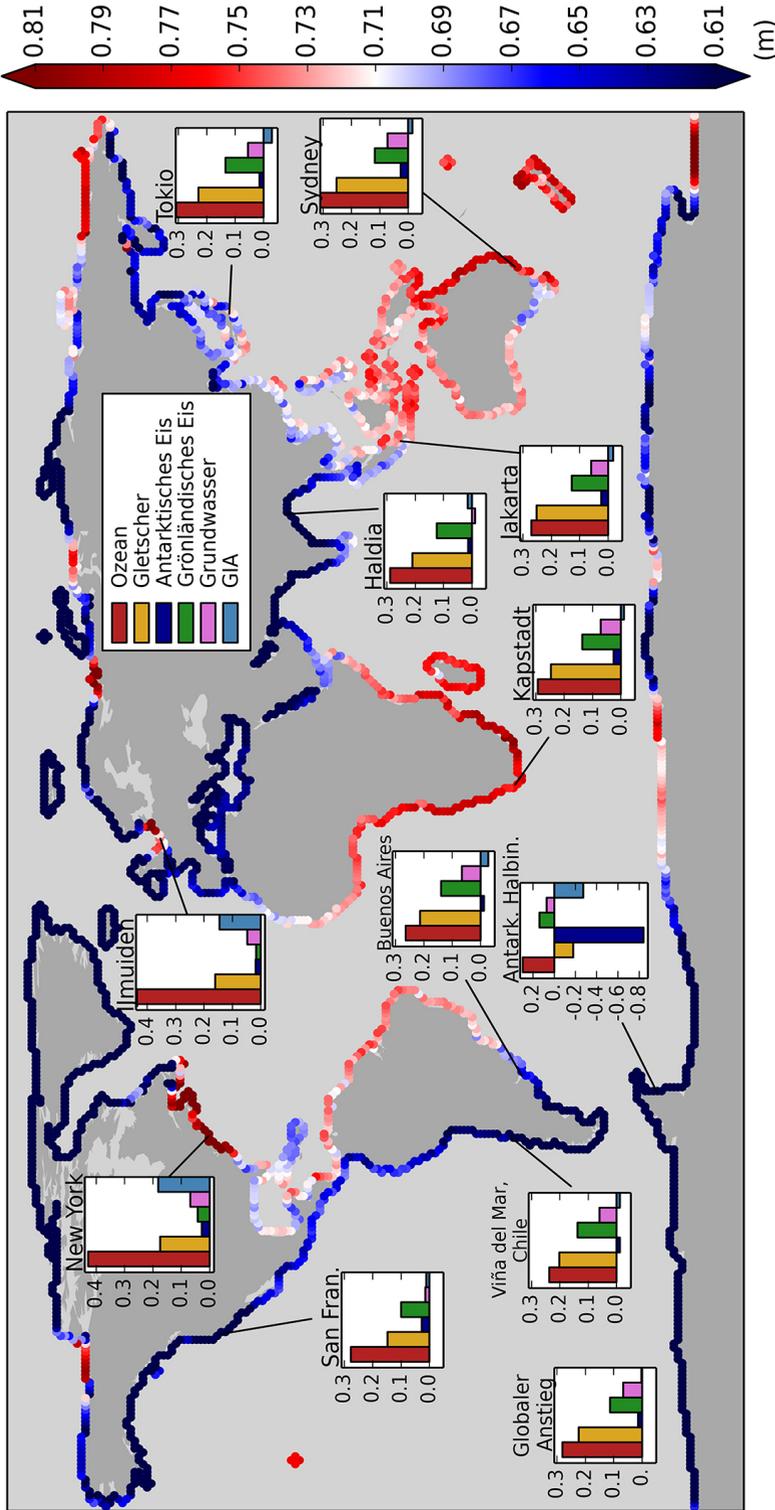


Abb. 6.5-5: Meeresspiegelanstieg an den Küsten für das RCP8.5 Szenario einschließlich der Beiträge verschiedener Ursachen für 2081-2100 bezogen auf 1986-2005 (in m). Der zentrale Wert der Farbskala in weiß gibt den globalen Mittelwert wieder. Die roten Bereiche der Küsten verzeichnen somit voraussichtlich einen überdurchschnittlichen Anstieg und die blauen einen geringeren. Die Boxen zeigen für eine Reihe von ausgewählten Orten die Höhe der Beiträge in m zum Meeresspiegelanstieg. Unter GIA ist der Beitrag der immer noch stattfindenden Landbewegung seit der letzten Eiszeit zu verstehen.

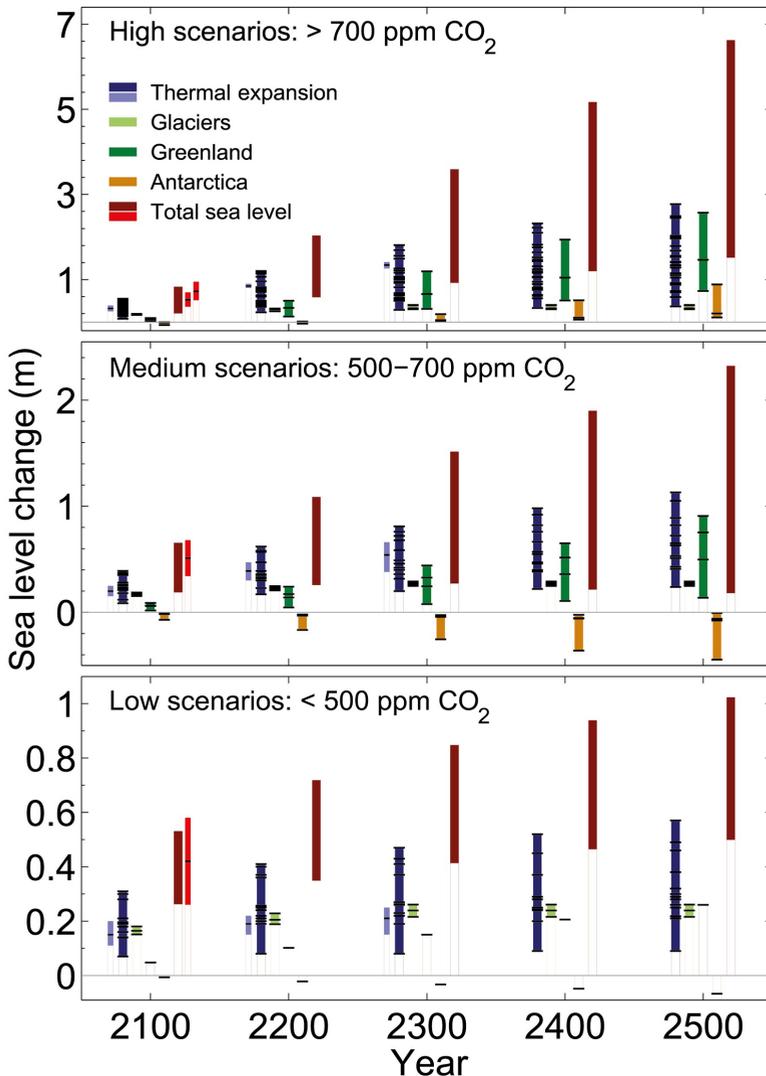


Abb. 6.5-6: Schätzungen der Meeresspiegelanstiegsprojektionen jenseits von je nach Konzentration der Treibhausgase im Jahr 2100 für drei verschiedene Szenarien (in CO₂-Äquivalente), (**oben:** >700 ppm einschließlich RCP6.0 und RCP8.5, **Mitte:** 500-700 ppm einschließlich RCP4.5; **unten:** <500 ppm einschließlich RCP2.6). Die farbigen Balken zeigen den gesamten Bereich unterschiedlicher Modellresultate. Der Gesamtbereich des kombinierten totalen Signals ist so gewählt, dass die maximal mögliche Spanne durch die verschiedenen Abschätzungen der vier verschiedenen Beiträge repräsentiert wird. Die hellrot schattierten Balken zeigen die wahrscheinliche Bandbreite der Meeresspiegelprojektion für das 21. Jahrhundert entsprechend der Szenarien. In dem oberen Feld entspricht der linke hellrote Balken RCP6.0 und der rechte hellrote Balken RCP8.5 (aus AR5, CHURCH et al. 2013; Fig. 13.13).

Unsicherheiten in den Meeresspiegelprojektionen

Die größte Unsicherheit der Projektionen folgt aus der Reaktion der Eisschilde. Die Berechnungen auf Basis von Modellen und Beobachtungen sind für Grönland weniger unsicher als für die Antarktis, obwohl grundsätzlich für alle Eisschilde die Möglichkeit besteht, dass Teile der Eisschilde rasch zusammenbrechen, wie z.B. das Larsen-B-Schelfeis im Jahr 2002. Diese Zu-

sammenbrüche sind schwer zu modellieren. Darüber hinaus ergeben sich für den EAIS auch Unsicherheiten aus der nicht voll verstandenen Dynamik der Eisschilde. Verschiedene Modelle zeigen auch unterschiedlich starke Reaktionen auf die anthropogenen Einflüsse, die sich dann auch in unterschiedlichen Mustern der Veränderungen der Meeresströmungen oder der Windsysteme äußern. Aber insbesondere auf kürzeren Zeitskalen von Jahrzehnten spielt die Klimavariabilität eine

größere Rolle. Multidekadische Klimavariabilität bedingt somit ebenfalls einen Teil der Unterschiede zwischen den Modellen, wie auch zwischen Modell und der Wirklichkeit (LYU et al. 2014).

Weiter in die Zukunft

Die Unsicherheiten der Projektionen des mittleren Anstiegs des Meeresspiegels, die mit dem Abschmelzen des Landeises verbunden sind, werden umso größer, je weiter man in die Zukunft blickt. Im Laufe von Jahrhunderten und Jahrtausenden werden die Eisschilde voraussichtlich mehr und mehr zum Anstieg beitragen und den Beitrag der Gletscher übertreffen (Abb. 6.5-6). Nach 2500 werden die Gletscher wahrscheinlich auch bei schwachen Erwärmungsszenarien fast vollständig verschwunden sein. Dies wird durch die hellgrünen Balken im unteren Bereich, die sich nach 2300 nicht weiter erhöhen, illustriert. Die geringe Unsicherheit des Beitrags der Gletscher erklärt sich allein aus der Unsicherheit des globalen Gletschervolumens. Das mittlere Erwärmungsszenario legt nahe, dass die Antarktis durch eine erhöhte Akkumulation des EAIS den Meeresspiegelanstieg abschwächen wird. Jedoch ist diese Schätzung wegen der unzureichenden Modellphysik unsicher (AR5 Kap. 13). Im höheren Erwärmungsszenario wirken sich der GIS und der AIS wahrscheinlich zunehmend auf den Meeresspiegelanstieg aus (Abb. 6.5-6, oberes Bild), sie tragen in 2500 bis zu 3 m bei.

Ein weiterer großer Beitrag zum Meeresspiegelanstieg ist mit der Wärmeausdehnung des Meerwassers verbunden. Durch die große Tiefe der Meere und die damit verbundene sehr hohe Speicherfähigkeit für Wärme hinkt die Erwärmung der Ozeane derjenigen der Lufttemperaturen deutlich hinterher, da die Ozeane nur an der Oberfläche mit der Atmosphäre Wärme austauschen können. Daher werden sich die Ozeane auch noch viele Jahrhunderte, nachdem die Erwärmung der Luft zum Stillstand gekommen ist, weiter erwärmen. Deshalb wird auch der durch Wärmeausdehnung verursachte Meeresspiegelanstieg noch lange anhalten.

Über längere Zeiträume kann eine unverminderte Erderwärmung auch erhebliche Mengen Landeis schmelzen. Bei einer anhaltenden Temperaturerhöhung um 3 °C für die nächsten 2.000 Jahre kann Grönland den Meeresspiegel um mehr als 1 m steigen lassen und das antarktische Eis kann mehr als 3 m dazu beitragen. Zusammen mit den weiteren Komponenten könnte der Meeresspiegel über diesen Zeitraum um mehr als 6 m steigen. Wird dieser Temperaturanstieg über viele Jahrtausende aufrechterhalten, könnte der GIS weitestgehend verschwinden und 6 m zum globalen Meeresspie-

gelanstieg beitragen, während der Amstieg durch die Antarktis vermutlich noch einmal um ca. 3 m betragen würde. Jedoch ist dies immer noch ein Gebiet andauernder Forschung.

Schlussbetrachtung

Das Eis auf den Kontinenten braucht lange – typischerweise einige zehntausend Jahre – um auf das große Volumen in einer Eiszeit zu wachsen. Es schmilzt zwar rascher ab, braucht aber auch dafür natürlicherweise etwa 10.000 Jahre. Die globale Erwärmung durch uns Menschen wird sehr wahrscheinlich zu einem erheblichen Verlust dieser Eismassen innerhalb von Jahrhunderten und wenigen Tausend Jahren führen, was wiederum das Klima weltweit ändern wird. In einer geologisch sehr kurzen Zeit geht damit durch uns Menschen eine langfristige Änderung der Geographie der Erde einher.

Literatur

- ARENDETT, A., T. BOLCH, J. G. COGLEY, A. GARDNER, et al. (2012): Randolph Glacier Inventory [v2.0]: A Dataset of Global Glacier Outlines. Global Land Ice Measurements from Space, Boulder Colorado, USA. Digital Media. 32 pp.
- CARSON, M., A. KÖHL, D. STAMMER, A. B. A. SLANGEN, C. A. KATSMAN, R. S. W. VAN DE WAL, J. CHURCH & N. WHITE (2015): Coastal sea level changes, observed and projected during the 20th and 21st century. *Climatic Change*, under review.
- CHURCH, J. A., P. U. CLARK, A. CAZENAVE, J. M. GREGORY, et al. (2013): Sea Level Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Stocker, T.F., et al., (eds.). Cambridge University Press, 1137-1216.
- IPCC (2007): *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R.K & A. Reisinger (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- LYU, K., X. ZHANG, J. A. CHURCH, A. B. A. SLANGEN & J. HU (2014): Time of emergence for regional sea-level change. *Nature Climate Change*, 4, 1006-1010.
- PELTIER, W. (2004): Global glacial isostasy and the surface of the ice-age earth. *Annu Rev Earth Planet Sci* 32:111-149.
- SHEPHERD, A., E. R. IVINS, A. GERUO, V. R. BARLETTA, M. J. BENTLEY, et al. (2012): A reconciled estimate of ice-sheet mass balance. *Science*, 338, 1183-1189.
- SLANGEN, A. B. A., M. CARSON, C. A. KATSMAN, R. S. W. VAN DE WAL, A. KÖHL, L. L. A. VERMEERSEN & D. STAMMER (2014): Projecting twenty-first century regional sea-level changes. *Climatic Change*, 124, 317-332.
- VAUGHAN, D. G., J. C. COSIMO, I. ALLISON, J. CAR-RASCO, et al. (2013): Observations: Cryosphere. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Stocker, T.F., et al. (eds.). Cambridge University Press, 317-382.
- WADA, Y., L. P. H. VAN BEEK, F. C. S. WEILAND, B. F. CHAO, Y. H. WU & M. F. P. BIERKENS (2012): Past and future contribution of global groundwater depletion to sea-level rise. *Geophysical Research Letters*, 39, L09402.
- YIN, J., S. M. GRIFFIES, & R. J. STOUFFER (2010): Spatial variability of sea-level rise in 21st century projections. *J. Climate*, 23, 4585-4607.

Kontakt:

Dr. Mark Carson & Dr. Armin Köhl
 Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit
 (CEN) der Universität Hamburg
 mark.carson@uni-hamburg.de

Carson, M. & A. Köhl (2015): Eisschilde und Meeresspiegel. In: Lozán, J. L., H. Grassl, D. Kasang, D. Notz & H. Escher-Vetter (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Das Eis der Erde*. pp. 245-250. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal.klima.eis-der-erde.37